

COMPORTAMENTO À TRACÇÃO EM FLEXÃO DE BETÕES DE DESEMPENHO MELHORADO



AIRES CAMÕES

Assistente
UM
Guimarães



JOAQUIM BARROS

Prof. Auxiliar
UM
Guimarães



BARROSO AGUIAR

Prof. Associado
UM
Guimarães

SUMÁRIO

A substituição parcial de cimento por cinzas volantes tem sido utilizada por razões económicas e de trabalhabilidade da mistura. O conhecimento acerca da influência da idade e da percentagem de cinzas no comportamento em flexão do betão, principalmente na sua capacidade de absorção de energia, é reduzido. O presente trabalho pretende dar um contributo nesta área.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de um material de matriz cimentícia é correntemente avaliado com base na sua resistência à compressão. Contudo, a qualidade de uma simulação numérica do comportamento até à rotura de uma estrutura de betão depende significativamente dos parâmetros de fractura desse betão [1], com especial relevo para a sua energia de fractura [2]. Para que os resultados obtidos com modelos constitutivos de análise não linear material de estruturas de betão não dependam da malha de elementos finitos adoptada na discretização da estrutura é necessário que a lei que simula o comportamento em amolecimento do betão fendilhado seja definida com base na energia de fractura do betão [3]. Este conceito representa a energia necessária para criar uma fenda de área unitária e avalia-se por intermédio de ensaios de tracção uniaxial ou de flexão sob três ou quatro pontos de carga [4]. A execução estável deste tipo de ensaios exige equipamentos com algoritmos de controlo sofisticados e estruturas de reacção bastante rígidas, pelo que bastante onerosos, principalmente os que permitem efectuar ensaios de tracção uniaxial [5].

Neste trabalho são descritos os ensaios efectuados com prismas entalhados de betão de desempenho melhorado, com cimento (C) parcialmente substituído por cinzas volantes (CV). A energia de fractura deste material, para diferentes idades do betão e para diferentes percentagens de substituição de C por CV é avaliada. Os resultados obtidos são analisados.

2. COMPOSIÇÕES, FABRICO E CONSERVAÇÃO

Os agregados utilizados na amassadura dos betões estudados foram, todos eles, resultado da britagem de rocha granítica e provenientes da mesma pedreira. As suas características mais relevantes encontram-se descritas em [6-8], sendo, contudo, de realçar o facto de terem sido utilizadas duas areias britadas ($D_{\text{máx}} = 2.38 \text{ mm}$ e $D_{\text{máx}} = 4.76 \text{ mm}$) e uma brita com máxima dimensão de 9.53 mm conforme fornecidas, i.e., sem se proceder a qualquer lavagem dos materiais ou qualquer outro tipo de tratamento prévio. O cimento utilizado foi do tipo I, classe 42.5R. A composição química, bem como as propriedades físicas e mecânicas do cimento, estão apresentadas em [6-8]. As CV usadas são provenientes da central termoeléctrica do Pego, com teores de carbono que variam entre 6% e 9%. Segundo a regulamentação Europeia [9] o valor máximo do teor de carbono deve ser de 5%, somente podendo alcançar o valor de 7% caso existam regulamentos ou normativas nacionais que o permitam. Esta condicionante pode questionar a utilização em obra das CV empregues no presente trabalho. As principais características das CV encontram-se descritas em [6-8]. A quantidade de superplastificante (SP), foi estimada recorrendo aos resultados de uma série de ensaios com o cone de Marsh sobre pastas, tendo-se obtido valores entre 0.5% a 1% do peso do ligante para quantidade óptima (ponto de saturação) de adição de SP [6, 8]. Por razões económicas o valor de SP adoptado neste trabalho foi de 0.5%.

Foram realizadas oito amassaduras correspondentes a duas dosagens de ligante ($L=C+CV$). As quantidades de ligante foram fixadas em 500 kg/m^3 e 600 kg/m^3 e a respectiva relação água/ligante (A/L) em 0.3 e 0.25. As dosagens dos agregados foram estimadas por intermédio da aplicação do método de Faury [10]. As composições dos betões estudados estão apresentadas na tabela 1. Na mnemónica utilizada para referenciar os betões produzidos, o primeiro número traduz a dosagem de ligante e o número a seguir a CV representa a percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes.

Tabela 1 – Composição dos betões

Betão	A/L	C (kg/m^3)	CV (kg/m^3)	Areia 1 (kg/m^3)	Areia 2 (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)
500CV0	0.3	500	0	502.92	308.43	865.61
500CV20	0.3	400	100	461.85	334.01	869.82
500CV40	0.3	300	200	406.91	349.01	847.11
500CV60	0.3	200	300	364.24	373.70	848.70
600CV0	0.25	600	0	377.30	367.85	850.73
600CV20	0.25	480	120	326.57	399.51	856.01
600CV40	0.25	360	240	271.28	407.93	832.76
600CV60	0.25	240	360	223.26	421.23	824.23

Para avaliar a resistência à compressão ao longo do tempo foram moldados provetes cúbicos de 100 mm de aresta. O comportamento em flexão foi avaliado por intermédio de ensaios em prismas de $850 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, com 800 mm de vão [2].

Após a realização das amassaduras os provetes foram conservados em câmara húmida a uma temperatura de 21°C e humidade relativa de 80%. Um dia após a betonagem procedeu-se à desmoldagem dos provetes e sua imersão em água, onde permaneceram até à data da realização dos ensaios. Atingida a referida data, antes da realização do ensaio de flexão, foi necessário proceder-se à realização de um entalhe com aproximadamente 25 mm de profundidade e 5 mm de espessura, localizado a meio vão do provete, na face oposta à de betonagem e desenvolvendo-se perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. O entalhe foi efectuado através de corte húmido com serra mecânica apropriada.

3. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O comportamento em flexão foi avaliado por intermédio de ensaios de flexão sob três pontos de carga. A disposição dos transdutores e o carregamento estão representados na Figura 1. Na Figura 2 inclui-se uma foto de um ensaio. O ensaio foi controlado pelo transdutor de deslocamentos indutivo designado por TDI1, de 5 mm de campo e 0.05% de precisão. Este transdutor está ligado a uma barra que se apoia em dois pontos fixos do provete, de forma a não serem registados deslocamentos parasitas (ver Figura 1b). Para determinar as extensões na zona de fractura foram aplicados dois transdutores de deslocamentos, dispostos de acordo com o esquema representado na Figura 1c. Assim, junto à face inferior foi aplicado um transdutor indutivo com 5 mm de campo e 0.09% de precisão (TDI2) e a meia altura da superfície de fractura dispôs-se um transdutor resistivo de 6.3 mm de campo e 0.05% de precisão (TDR). A força foi determinada por meio de uma célula de carga de 10000 N de capacidade e 0.05% de precisão. Os ensaios foram efectuados com uma velocidade de deslocamento de 0.36 mm/minuto.

Para efectuar os ensaios utilizou-se um sistema controlado em malha fechada, que tem vindo a ser desenvolvido e melhorado durante os últimos três anos. A descrição pormenorizada deste equipamento encontra-se em outro trabalho [11].

A rigidez da estrutura de reacção e o ganho do sistema que controla o ensaio são variáveis fundamentais para a estabilidade deste tipo de ensaio, principalmente quando se trata de provetes de materiais frágeis, como é o caso do presente trabalho. A definição destas características foram estabelecidas no decorrer de outros trabalhos de investigação [12], pelo que as configurações utilizadas na campanha de ensaios realizada permitiram executar ensaios estáveis.

A prensa utilizada na avaliação da resistência à compressão dos betões produzidos pode ser controlada pelo equipamento desenvolvido, anteriormente referido. Assim, os ensaios de compressão foram realizados sob controlo de deslocamento, tendo-se utilizado um transdutor indutivo de 5 mm de campo e 0.09% de precisão e empregue uma velocidade de deslocamento de 0.36 mm/minuto.

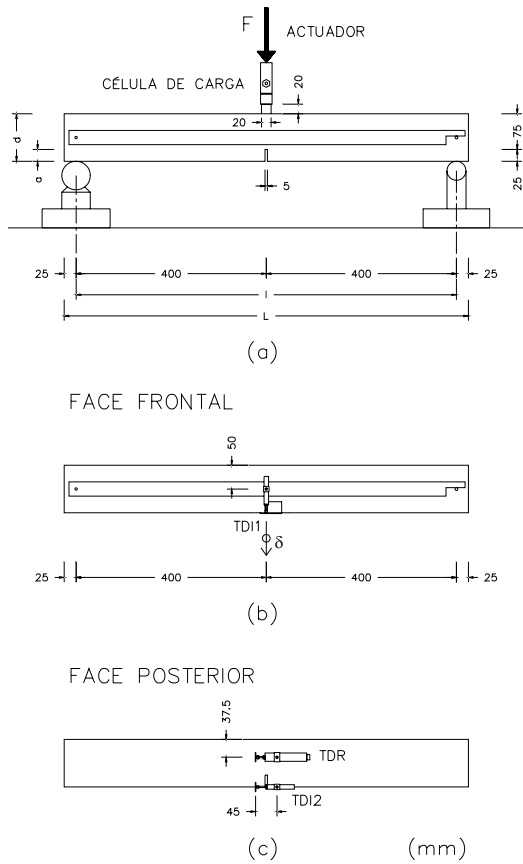


Figura 1 – Esquema do ensaio de flexão.

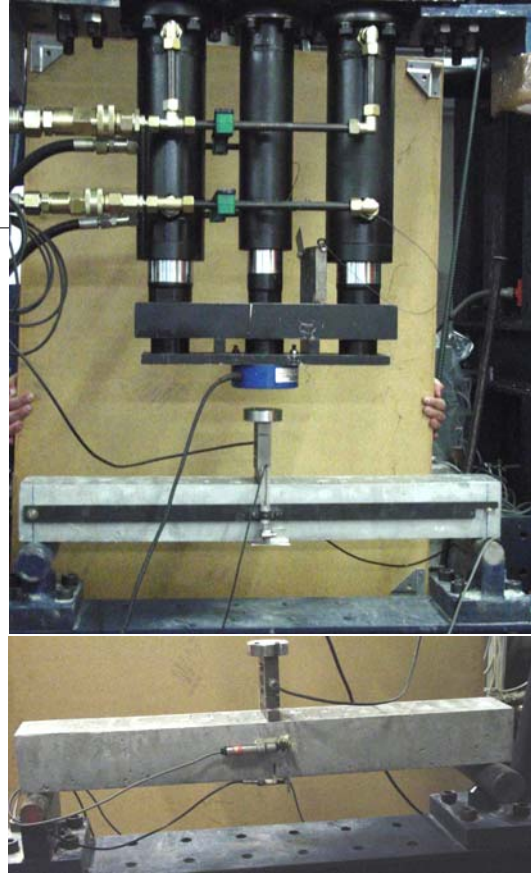


Figura 2 – Foto do ensaio de flexão.

A energia de fractura, G_f , foi determinada segundo a expressão proposta pela RILEM [2]:

$$G_f = \frac{W_0 + [m_1 \times (1 - \alpha^2) + 2 \times m_2] \times g \times \delta_u}{SF} \quad (1)$$

em que W_0 é o trabalho produzido pela carga F exercida pelo actuador durante a deformação do provete (área sob a curva $F - \delta$), m_1 é a massa do provete entre apoios, m_2 é a massa do equipamento que acompanha a deformação do provete durante o ensaio e que não está acoplada ao actuador, $\alpha = L/l - 1$ é o parâmetro que corrige o trabalho produzido pelo peso próprio do provete, tendo em conta o facto de L poder ser diferente de l , g é a aceleração da gravidade, δ_u é a flecha última, i.e., o deslocamento registado no fim do ensaio, quando $F = 0$ e $SF = b(d - a)$ é a área da superfície de fractura projectada para o plano acima do entalhe e na ortogonal ao eixo longitudinal do provete, sendo b a largura da secção do provete.

A resistência máxima à tracção em flexão na secção do entalhe, tendo em conta a acção do peso próprio do provete e de possíveis massas de equipamento não acopladas ao actuador de carga, $f_{ct,fl}^{net}$, obtém-se por intermédio da seguinte expressão [4]:

$$f_{ct,fl}^{net} = 1.5 \times \frac{[F_{\max} + 0.5 \times m_1 \times g \times (1 - \alpha^2) + m_2 \times g] \times l}{b \times (d - a)^2}. \quad (2)$$

Neste trabalho, o módulo de elasticidade do betão foi determinado por intermédio do ensaio de flexão, tendo-se adoptado a expressão proposta por Petersson [14], obtida com base na teoria da elasticidade:

$$E_c = \left[1 + 3.15 \times (d/l)^2 + 8 \times \frac{d}{l} \times g(a/d) \right] \times \frac{1}{4b} \times (l/d)^3 \times \frac{dF}{d\delta}. \quad (3)$$

Nesta expressão, $g(a/d)$ é uma função que depende do factor a/d e que para $0.45 < a/d < 0.55$ pode ser obtida segundo a relação

$$g(a/d) = \frac{0.15}{(1 - a/d)^3}, \text{ se } 0.45 < a/d < 0.55 \quad (4)$$

Para a/d fora deste intervalo, Hillerborg [13] sugere os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de $g(a/d)$ para $0 < a/d \leq 0.5$.

a/d	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$g(a/d)$	0.035	0.14	0.32	0.63	1.20

Na expressão (3) $dF/d\delta$ representa a inclinação do ramo linear ascendente da resposta $F - \delta$ obtida no ensaio de flexão sob três pontos de carga.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 3 apresentam-se as relações carga-flecha para as composições com 500 kg/m^3 de ligante, para as diferentes percentagens de cinzas volantes e para as idades estudadas. Cada curva representa a média registada em três provetes. A flecha é o deslocamento registado no transdutor TDI1 (ver Figura 1b). Da análise destas curvas podem-se retirar as observações seguintes:

- Para 0% de CV o $f_{ct,fl}^{net}$ e a capacidade de absorção de energia (CAE) variam marginalmente com a idade do betão;
- Aumentando a percentagem de CV, o $f_{ct,fl}^{net}$ e a CAE aumentam significativamente com a idade do betão;

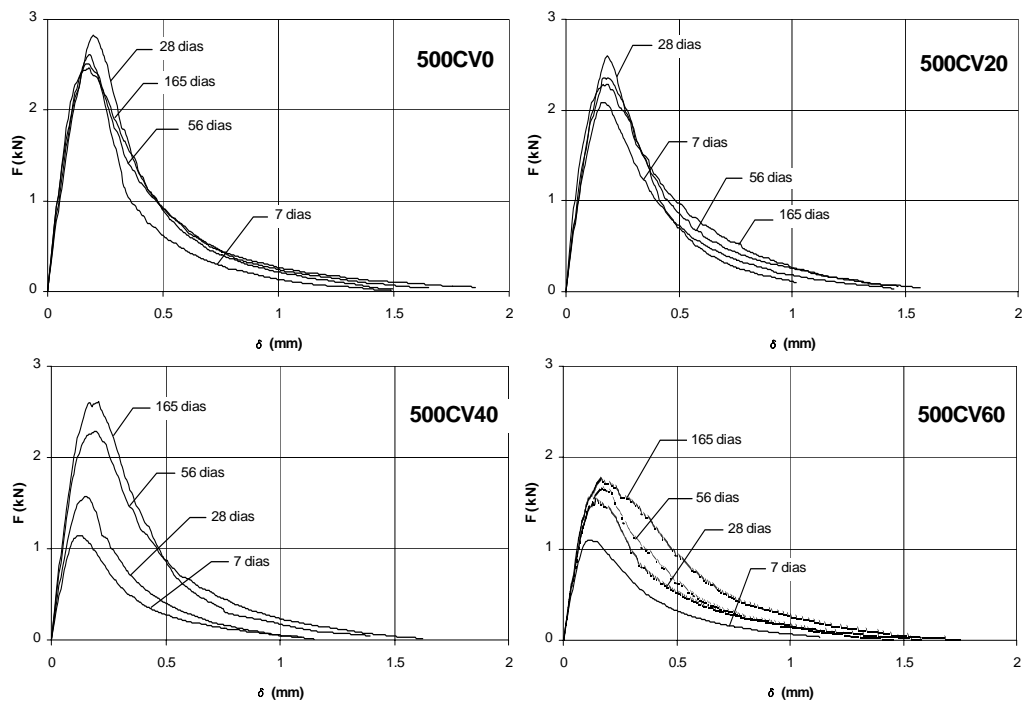


Figura 3 - Relações carga-flecha para as composições com 500 kg/m³ de ligante.

- Até 40% de CV o $f_{ct,fl}^{net}$ e a CAE de betões com idades superiores a 56 dias são da mesma ordem de grandeza dos obtidos nas composições com 0% de CV aos 28 dias. Contudo, nas composições com 60% de CV, mesmo à idade de 165 dias o $f_{ct,fl}^{net}$ e a CAE são significativamente inferiores àqueles valores de referência.

Em termos gerais, estas observações aplicam-se às composições com 600 kg/m³ de ligante.

Na Figura 4 apresenta-se a variação do $f_{ct,fl}^{net}$ com a idade dos provetes, para diferentes percentagens de CV. Da análise desta figura podem-se extrair as notas seguintes:

- O valor de $f_{ct,fl}^{net}$ aumenta significativamente dos 7 para os 28 dias, permanecendo aproximadamente constante após esta data (excepto nas composições com 40% de CV);
- A composição com 60% de CV apresenta valores de $f_{ct,fl}^{net}$ marcadamente inferiores aos das restantes composições;
- Para composições com percentagens de CV menor ou igual a 40% e idades superiores a 56 dias registaram-se valores de $f_{ct,fl}^{net}$ da mesma ordem dos da composição sem CV. Assim, se as acções de dimensionamento de uma estrutura poderem ser aplicadas posteriormente à idade referida, é possível obter significativa economia em termos de ligante.

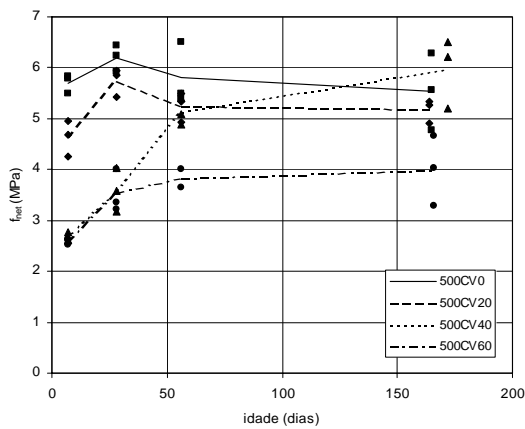


Figura 4 – Relação entre a resistência à tracção em flexão na secção do entalhe e a idade para os betões com 500 kg/m³ de ligante ($f_{net} = f_{ct,fl}^{net}$).

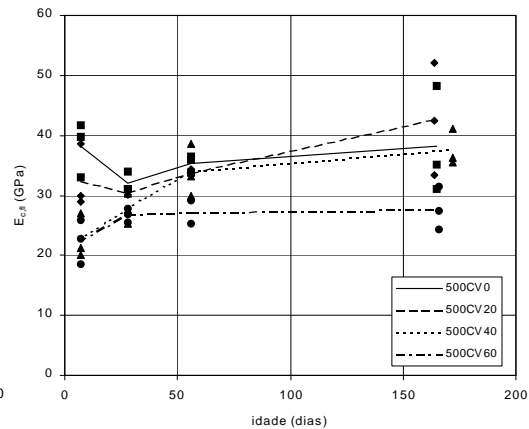


Figura 5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a idade à data do ensaio para as composições com 500 kg/m³ de ligante.

As observações efectuadas para as composições com 500 kg/m³ de ligante aplicam-se também às composições com 600 kg/m³.

Na Figura 5 representa-se a evolução do módulo de elasticidade para as composições com 500 kg/m³ de ligante, para as diferentes percentagens de cinzas volantes. Para as composições com 600 kg/m³ de ligante obtêm-se relações revelando tendências semelhantes às observadas na Figura 5.

Da análise das curvas da Figura 5 podem-se retirar as observações seguintes:

- O valor de $E_{c,fl}$ diminui com o aumento da percentagem de CV no ligante, sendo esta diminuição mais significativa nos primeiros dias de idade;
- Mesmo para idades superiores a 28 dias, o $E_{c,fl}$ de composições com 60% de CV é significativamente inferior ao das restantes composições;
- Até aos 56 dias as composições com 0% e 20% de CV apresentam reduzida variação de $E_{c,fl}$, enquanto as restantes composições desenvolvem acréscimo significativo. A partir dos 56 dias a variação desta propriedade é marginal;
- Para idades superiores aos 28 dias, o valor de $E_{c,fl}$ das composições com 40% de CV alcança um valor próximo do das composições com conteúdos em CV inferiores a esse valor

Na Figura 6 apresenta-se a evolução da energia de fractura com o tempo para as composições com 500 kg/m³ de ligante, para as diferentes percentagens de CV. Da análise desta figura pode-se apontar o seguinte:

- A ordem dos valores registados são semelhantes aos obtidos por outros autores [13,15], revelando a adequabilidade da configuração do provete utilizado e dos procedimentos de ensaio adoptados neste trabalho.

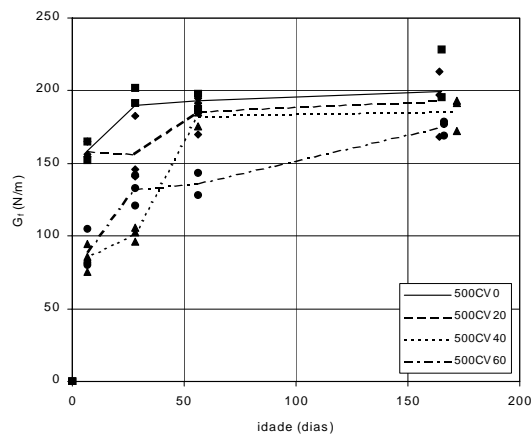


Figura 6 – Energia de fractura em diferentes idades, para os betões com 500 kg/m³ de ligante.

- Em termos gerais verifica-se um decréscimo de G_f com a percentagem de CV. Contudo, este decréscimo é reduzido para composições com idade acima dos 56 dias e com quantidade de CV até 40%.
- Para todas as composições com 500 kg/m³ de ligante verificou-se que a G_f aumenta até aos 56 dias, enquanto, nas composições com 600 kg/m³ de ligante o aumento de G_f é significativo apenas até aos 28 dias. Esta constatação parece indicar que aumentando à quantidade de cimento, o período de tempo para alcançar a máxima energia de fractura do material diminui. O comportamento da composição com 500 kg/m³ de ligante e com 60% de CV ($C=200$ kg/m³ e $CV=300$ kg/m³) demonstra isto mesmo, dado que a G_f aumenta até à idade máxima do estudo efectuado.

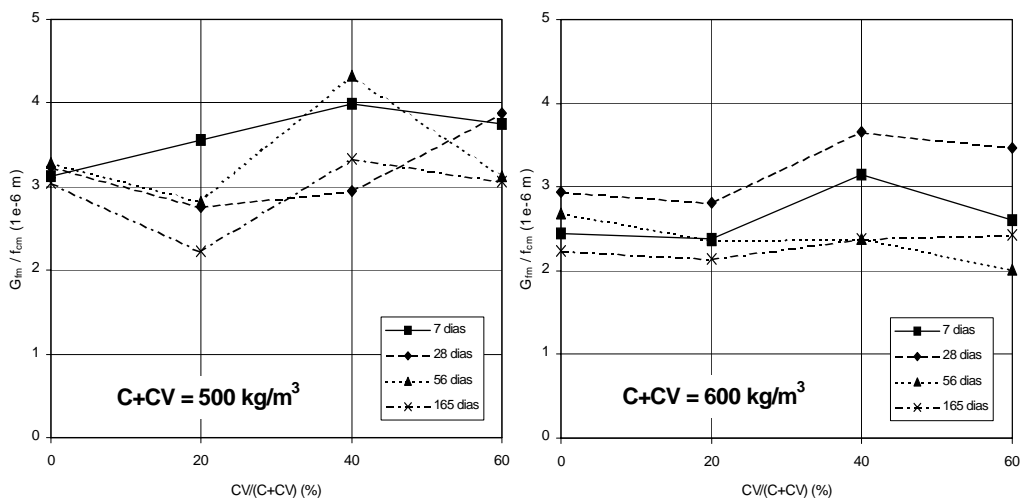


Figura 7 – Energia de fractura normalizada pela resistência à compressão.

A Figura 7 ilustra a relação entre a dosagem de CV e a energia de fractura normalizada, \overline{G}_f , que resulta da divisão de G_{fm} (média dos valores da energia de fractura de determinada composição) pela respectiva resistência média à compressão, f_{cm} .

Da análise dos gráficos incluídos na Figura 7 pode-se constatar que:

- Aumentando a dosagem de ligante de 500 para 600 kg/m³ o \overline{G}_f diminui, pelo que os betões tornam-se mais frágeis;
- De 0% para 20% de CV verifica-se um decréscimo de \overline{G}_f para todas as idades estudadas, excepto aos 7 dias na composição com 500 kg/m³ de ligante, indicando um maior aumento em f_{cm} do que em G_{fm} ;
- De 20% para 40% de CV ocorre um aumento significativo de \overline{G}_f , revelando um maior incremento em G_{fm} do que em f_{cm} ;
- Para a maior parte das idades estudadas, o máximo de \overline{G}_f ocorre nas composições com 40% de CV, indicando serem estas as composições mais dúcteis. Para esta percentagem de CV, os valores de \overline{G}_f registados nas composições com 500 kg/m³ de ligante (500CV40) são significativamente superiores aos obtidos nas amassaduras com 600 kg/m³, facto que deve estar associado aos valores de f_{cm} anormalmente baixos registados nas composições 500CV40 devido, provavelmente a algum problema no controlo da composição;
- De 40% para 60% de CV, em termos gerais, o \overline{G}_f volta a diminuir, revelando um maior decréscimo de G_{fm} do que em f_{cm} , pelo que este tipo de composição, além de menos resistente, é ainda mais frágil.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que, em composições constituídas por percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes atingindo valores iguais ou inferiores a 40%, as propriedades mecânicas avaliadas são semelhantes às determinadas na composição de referência (sem adição de cinzas volantes) a partir da idade de 56 dias. Para percentagens de substituição de 60%, mesmo para idades mais avançadas, o desempenho do betão afasta-se significativamente do de referência, apresentando um pior comportamento.

Se o desempenho de um betão for avaliado pelos custos dos seus materiais constituintes e pelos valores da resistência à tracção em flexão, módulo de elasticidade em flexão e energia de fractura, pode-se concluir, com base nos resultados obtidos neste trabalho, que a composição em que 40% do cimento foi substituída por cinzas volantes é, de entre as estudadas, a de maior desempenho, desde que as sobrecargas a aplicar à estrutura constituída por esse betão sejam aplicadas após 56 dias da sua betonagem.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Hordijk, D.A. *Local approach to fatigue of concrete*, Dissertation, Delft University of Technology, 1991.
- [2] RILEM, Draft Recommendation, 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete, “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bending tests on notched beams”, *Materials and Structures*, Vol. 85, Nº 85, 1985, pp. 285-290.
- [3] Bazant, Z.P., Oh, B.H., “Crack band theory for fracture of concrete”, *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 16, Nº 93, 1983, pp. 155-177.
- [4] Barros, J. A. O., *Comportamento do betão reforçado com fibras – análise experimental e simulação numérica*, Tese de Doutoramento, FEUP, Dezembro de 1995.
- [5] Wang, Y., Li, V.C., Backer, S., “Experimental determination of tensile behavior of fibre reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, Nº 5, 1990, pp. 461-468, September-October.
- [6] Camões, A. et al., “Low cost high performance concrete using low quality flay ash”, *ERMCO98, 12th european ready mixed concrete congress*, Lisboa, June 1998, p.478-486.
- [7] Camões, A. et al., “Caracterização mecânica de betões de elevado desempenho com cinzas volantes”, *JPEE98, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, 25 a 28 de Novembro de 1998, p. 517-525.
- [8] Rocha, P., *Betões de elevado desempenho com recurso a materiais e processos correntes*, Tese de Mestrado, UM, Outubro de 1999.
- [9] NP EN450 1995, *Cinzas volantes para betão, definições, exigências e controlo da qualidade*, Instituto Português da Qualidade, Fevereiro 1996.
- [10] J. Faury, *Le Béton*, Editions Dunod, Paris, 1958.
- [11] Freitas, F.; Barros, J.A.O; Fonseca, P., *Manual do sistema de ensaio de estruturas – SENTUR*, Dep. de Eng^a Civil, Escola de Eng^a da Universidade do Minho, 40 pp., Setembro de 1998.
- [12] Barros, J.A.O., Sena Cruz, J. “Fracture energy of steel fibre reinforced concrete“ *Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures* (aceite para publicação 2000).
- [13] Hillerborg, A., *Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation*, Report to RILEM TC50-FMC, Report TVBM-3015, Lund, Sweden, 1983.
- [14] Peterson, P.-E., *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*, Lund Institute of Technology, Division of building materials, Report TVBM-1006.
- [15] Hillerborg, A., *Additional concrete fracture energy tests performed by 6 laboratories according to a draft RILEM recommendation*, Report to RILEM TC50-FMC, report TVBM-3017, 1984.